МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА ФОТОСФЕРНОМ УРОВНЕ СОЛНЦА

**Романов Д.В.¹, Романов К.В.¹, Романов В.А.²,
Степанов Е.А.², Майоров А.О.²**

¹*Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева,
Красноярск, Россия*

²*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

MATHEMATICAL MODELING OF THE GENERATION OF SUN- SPOTS AT THE PHOTOSPHERIC LEVEL OF THE SUN

**Romanov D.V.¹, Romanov K.V.¹, Romanov V.A.²,
Stepanov E.A.², Mayorov A.O.²**

¹*Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafieva,
Krasnoyarsk, Russia*

²*Saratov National Research State University N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia*

This paper investigates the process of adiabatic cooling of a magnetic tube as it floats up from the middle layers of the convective zone to the photospheric level. A sharp decrease in temperature and magnetic pressure in the tube was obtained at depths near the photospheric level. The values of the MHD-parameters in the tube are close to the parameters of standard sunspots.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-225-228

1. Введение

В солнечных пятнах реализуется выход сильных магнитных полей из верхних слоёв конвективной зоны в атмосферу Солнца [1]. Структура расположения солнечных пятен на фотосферном уровне фактически определяет пространственную структуру всей активной области в пределах солнечной атмосферы [2]. Визуальная регистрация расположения солнечных пятен производится по эффекту резкого падения температуры газа в пятнах (~4000 K) по сравнению с температурой окружающего газа (~6000 K). Феномен резкого понижения температуры газа в области тени пятна детально не изучен вплоть до настоящего времени. В монографии Паркера [3] имеется указание на реализацию охлаждения газа в пятнах за счёт протекания нелинейных МГД-процессов при всплывании сильных магнитных полей из конвективной зоны в атмосферу Солнца.

В настоящей работе исследуется процесс адиабатического охлаждения тонкой магнитной трубки, всплывающей из средних слоёв конвективной зоны к фотосферному уровню. Начальные значения МГД-параметров определяются развитием неустойчивости Паркера в длинноволновой части спектра глобальных колебаний магнитных полей (волновое число $m = 10$, $\lambda = 400000$ км – характерный размер активной области). Результаты расчё-

тов обнаруживаю резкий рост нелинейности МГД-процессов при выходе трубки к фотосферному уровню, несомненно, важных для анализа зарождения солнечных пятен.

2. Результаты расчётов

В начальный момент времени магнитная трубка замкнута в кольцо в экваториальной плоскости Солнца. В положении равновесия выталкивающая сила Архимеда уравнивается силой натяжения магнитного поля. Вблизи положения равновесия реализуются два типа линейных колебаний магнитной трубки: быстрые (изгибные) альфвеновские волны, и медленные (варикозные) колебания с протечкой газа вдоль трубки (рис. 1а).

Волновым числом называется число стоячих волн, укладывающихся по периметру трубки. В гравитационном поле Солнца наименее устойчивы варикозные (медленные) моды колебаний. При достаточно малых напряжённостях магнитного поля области сгущения газа проваливаются вниз, тонут (рис. 1а). Легкие участки остаются наверху. Газ из этих участков стекает вниз под действием силы тяжести, и лёгкие участки, теряя массу, под действием выталкивающей силы Архимеда с ускорением всплывают к фотосферному уровню. Так развивается неустойчивость Паркера для медленных мод колебаний магнитной трубки [3].

Рис. 1. Нелинейная фаза развития неустойчивости Паркера (а) для $m = 10$ (b).

При работе с конкретной моделью внутреннего строения Солнца [4] для выбранной длины волны (волнового числа m) начальное развитие неустойчивости Паркера определяется только одним свободным МГД-параметром. На рис. 1b представлено развитие неустойчивости Паркера для $m = 10$ и начальной напряжённости магнитного поля $H_0 = 4 \cdot 10^6$ Гс. Остальные параметры развития неустойчивости Паркера однозначно определяются по модели внутреннего строения [4]: глубина развития неустойчивости равна 938000 км ниже фотосферного уровня, начальная температура газа в трубке $T_i = 757000$ К. Однозначно определяются все остальные термодинамические параметры газа. Как следствие однозначно определяются также все МГД-параметры трубки (МГД-параметры формирующихся солнечных пятен) при всплытии на фотосферный уровень.

Рис. 2. Температура газа в трубке (а), отношение температур газа внутри и снаружи трубки в зависимости от глубины

На рис. 2 представлено изменение температуры газа в верхней точке всплывающей арочной магнитной структуры при подъёме до фотосферного уровня. Температура газа внутри трубки плавно уменьшается от начального значения 757000 K до 600 K на фотосферном уровне. При подъёме на всех глубинах конвективной зоны температура газа в трубке близка к температуре окружающей среды (отношение температур близко к единице) (рис. 2b). На глубинах меньших 10^4 км от фотосферного уровня температура газа внутри трубки резко понижается по отношению к температуре окружающего газа.

Рис. 3. Напряженность магнитного поля (а), отношение магнитного давления в трубке к давлению окружающего газа в зависимости от глубины

Аналогично ведёт себя напряжённость магнитного поля при подъёме трубки (рис. 3). Напряжённость поля в верхней точке арочной магнитной структуры плавно понижается от начального значения $H_0 = 4 \cdot 10^6$ Гс до 326 Гс на фотосферном уровне. Отношение магнитного давления в трубке к давлению окружающего газа стабильно держится в диапазоне $0,1 \div 0,2$ на всех глубинах. Начиная с глубины 10^4 км, давление магнитного поля резко понижается по отношению к давлению окружающего газа.

Феномен аномального поведения МГД-параметров трубки вблизи фотосферного уровня регистрируется также по изменению плотности газа в

трубке по сравнению с плотностью окружающей среды. Плотность газа внутри и снаружи трубки практически совпадают на всех стадиях подъёма (рис. 4а). И только вблизи фотосферного уровня плотность газа в трубке резко нарастает по сравнению с плотностью окружающего газа.

Рис. 4. Отношение плотностей газа внутри и снаружи трубки (а), скорость подъема магнитной трубки в зависимости от глубины

Резкий рост плотности газа связан с падением скорости подъёма магнитного поля в верхних слоях конвективной зоны. Начиная с глубин, меньших 10^4 км, поток резко тормозится и уплотняется (рис. 4б). Возникает нелинейный процесс: торможение потока приводит к росту плотности газа, а рост плотности приводит к ещё большему торможению трубки.

Заключение

Главный результат настоящей работы: развитие неустойчивости Паркера в длинноволновой части спектра глобальных колебаний магнитных полей (волновое число $m \leq 10$) обеспечивает всплывание магнитного потока к фотосферному уровню со значениями МГД-параметров, близкими к величинам, измеряемым в солнечных пятнах.

Вблизи фотосферного уровня резко уменьшается скорость подъёма магнитного поля, вследствие чего нелинейно растёт плотность газа. Нелинейно понижается температура газа и напряжённость магнитного поля. В результате образуется пробка холодного газа с пониженным магнитным давлением в области тени зарождающегося солнечного пятна. Эти результаты соответствуют данным наблюдений [1] и разработанным теоретическим моделям по строению солнечных пятен других авторов [2].

Литература

1. Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. – М.: Мир. – 1967. 383 с.
2. Обридо В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. – М.: Мир. – 1985. 255 с.
3. Паркер Е.М. Космические магнитные поля. Их образование и проявления – М.: Мир. Т. 1. – 1982. 608 с.
4. Christensen-Dalsgaard J., Dappen W., Ajukov S.V., et al. The current state of Solar modeling // Science. 1996. V. 272. P. 1286.